

ระบบสื่อสารสองทางระหว่างผู้ควบคุมและนักดำน้ำ ผ่านทุ่นสัญญาณเพื่อเพิ่มความปลอดภัยใต้น้ำ

พรเทพ บุญรักษา^{1*}

วันที่รับ 16 มิถุนายน 2568 วันที่แก้ไข 25 พฤศจิกายน 2568 วันที่ตอบรับ 17 ธันวาคม 2568

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแนวคิด การออกแบบ และผลการทดสอบต้นแบบระบบสื่อสารสองทางระหว่างผู้ควบคุมบนผิวน้ำและนักดำน้ำผ่านทุ่นสัญญาณแบบลอยน้ำ โดยมุ่งเน้นการส่งข้อความและวิดีโอแบบเรียลไทม์เพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการปฏิบัติงานใต้น้ำ ระบบต้นแบบประกอบด้วยสามส่วนหลัก ได้แก่ 1. หน่วยควบคุมบนผิวน้ำ (Surface Control Unit) 2. ทุ่นสัญญาณกลางน้ำ (Floating Relay Buoy) และ 3. ชุดนักดำน้ำ (Diver Unit) โดยใช้การสื่อสารไร้สายย่านความถี่มาตรฐาน IEEE 802.11 2.4 GHz / 5 GHz ร่วมกับสาย Ethernet กันน้ำ (Tether) และใช้โปรโตคอล ZMQ (ZeroMQ) สำหรับการสื่อสารข้อมูลแบบ Publish-Subscribe เพื่อให้สามารถส่งข้อความ สถานะระบบ และวิดีโอแบบสตรีมมิงได้อย่างมีประสิทธิภาพ การทดสอบระบบในสภาวะจำลองภาคสนามใช้ TP-Link EAP225 เป็นอุปกรณ์ Wireless Access Point / Bridge เชื่อมโยงการสื่อสารระหว่างหน่วยควบคุมบนผิวน้ำและชุดนักดำน้ำผ่านสาย Ethernet Tether โดยใช้ Raspberry Pi 4 และกล่อง USB เป็นหน่วยประมวลผลและส่งภาพ ผลการทดสอบพบว่าสามารถส่งข้อความจากผิวน้ำลงใต้น้ำและส่งวิดีโอจากนักดำน้ำขึ้นมาบนผิวน้ำได้แบบเรียลไทม์ โดยมีค่าความหน่วงเฉลี่ยต่ำกว่า 300 มิลลิวินาทีและไม่พบการสูญเสียแพ็กเกจในช่วงเวลา 10 นาที อย่างไรก็ตาม ระบบยังมีข้อจำกัดด้านระยะทางของสัญญาณไร้สาย ความยาวสาย Tether และยังไม่ได้ทดสอบในสภาวะใต้น้ำลึกหรือกระแสน้ำแรง รวมถึงยังไม่มี การเข้ารหัสข้อมูลและการจัดการ QoS สำหรับผู้ใช้หลายคน ผลการทดลองยืนยันว่าระบบสามารถทำงานได้จริงในภาคสนามและมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นเครือข่ายสื่อสารใต้น้ำแบบ Hybrid LAN/WLAN เพื่อสนับสนุนการปฏิบัติการดำน้ำในอนาคต

คำสำคัญ: การสื่อสารใต้น้ำ, ความปลอดภัยของนักดำน้ำ, ทุ่นสัญญาณ, การส่งสัญญาณไร้สาย, การตรวจสอบแบบเรียลไทม์

¹ ส่วนงานวิศวกรรมระบบจำลองยุทธศาสตร์และเครื่องช่วยฝึกเสมือนจริง, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

* ผู้แต่ง, อีเมล: ponrtep.b@dti.or.th

Two-Way Communication System between Surface Controller and Diver via Signal Buoy for Enhanced Underwater Safety

Porntep Bunraksa ^{1*}

Received 16 June 2025, Revised 25 November 2025, Accepted 17 December 2025

Abstract

This paper presents the concept, design, preliminary and experimental results of a prototype two-way communication system between a surface operator and a diver through a floating relay buoy. The system aims to provide real-time text and video transmission to enhance safety during underwater operations. The prototype consists of three main components: (1) Surface Control Unit, (2) Floating Relay Buoy, and (3) Diver Unit. Communication is established through standard IEEE 802.11 2.4 GHz/5 GHz wireless links combined with a waterproof Ethernet tether, utilizing the ZMQ (ZeroMQ) protocol in a publish – subscribe architecture for efficient data exchange. A field-like test was conducted using a TP-Link EAP225 device configured as a Wireless Access Point / Bridge to connect the surface control system with the diver unit through the Ethernet tether. The diver unit employed a Raspberry Pi 4 and a USB camera for processing and transmitting live video. The results show that the system successfully transmitted text messages from the surface to the diver and streamed live video from the diver to the surface in real time, with an average latency below 300 ms and no packet loss over a continuous 10-minute test period. Limitations include wireless range constraints, tether-induced mobility restrictions, and the absence of testing in deep or high-current underwater environments, as well as the lack of encryption and QoS management for multi-user applications. Experimental outcomes confirm that the proposed prototype operates effectively in field conditions and demonstrates the feasibility of a Hybrid LAN/WLAN underwater communication system for future diving operations.

Keywords: underwater communication, diver safety, signal buoy, wireless transmission, real-time monitoring

¹ Simulation Systems and Virtual Training Division, Defence Technology Institute

* Corresponding author, E-mail: porntep.b@dti.or.th

1. บทนำ

ในการฝึกอบรมนักดำน้ำ เมื่อเข้าสู่ขั้นตอนการฝึกแบบเดี่ยว (SOLO) ซึ่งนักเรียนดำน้ำจะได้รับอนุญาตให้ดำเนินการดำน้ำด้วยตนเอง ผู้ควบคุมการดำ (Dive Supervisor) บนผิวน้ำจะสามารถเฝ้าติดตามตำแหน่งของนักดำน้ำได้เพียงผ่านทุ่นสัญญาณ (Safety Buoy) ที่นักเรียนลากติดตัวไปเท่านั้น หากเกิดเหตุฉุกเฉิน นักดำน้ำจะใช้วิธีการกระตุกเชือกเพื่อแจ้งเตือน อย่างไรก็ตาม วิธีการดังกล่าวมีข้อจำกัดสำคัญคือ ไม่สามารถติดต่อสื่อสารจากผิวน้ำไปยังนักดำน้ำได้โดยตรง ทำให้ผู้ควบคุมไม่สามารถส่งคำเตือนหรือคำแนะนำใด ๆ ไปยังนักดำน้ำในระหว่างการปฏิบัติงานใต้น้ำได้

ข้อจำกัดนี้ส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของนักดำน้ำ โดยเฉพาะในสถานการณ์ที่มีความเสี่ยง เช่น เมื่อนักดำน้ำออกนอกพื้นที่ปฏิบัติงาน หรือมีอันตรายจากสิ่งแวดล้อมใต้น้ำ เช่น กระแสน้ำแรง หรือสัตว์น้ำอันตรายเข้าใกล้พื้นที่ปฏิบัติงาน การที่ผู้ควบคุมไม่สามารถสื่อสารหรือแจ้งเตือนนักดำน้ำได้ทันทั่วทั้งย่อมเพิ่มความเสี่ยงต่อชีวิตและทรัพย์สิน

เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว บทความนี้นำเสนอแนวคิดและต้นแบบระบบสื่อสารสองทางระหว่าง

ผู้ควบคุมบนผิวน้ำกับนักดำน้ำผ่านทุ่นสัญญาณแบบลอยน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 1 ระบบที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถส่งข้อความจากผิวน้ำไปยังนักดำน้ำ และรับส่งวิดีโอแบบเรียลไทม์จากกล้องของนักดำน้ำขึ้นมายังผู้ควบคุมบนผิวน้ำ โดยใช้เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สาย ความถี่มาตรฐาน IEEE 802.11 2.4 GHz/ 5 GHz และสายสัญญาณ Ethernet แบบกันน้ำ (Tether) พร้อมใช้โปรโตคอล ZMQ ในการรับส่งข้อมูล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจสอบและความปลอดภัยของการดำน้ำในทุกสถานการณ์

ระบบที่นำเสนอช่วยให้สามารถ:

- ส่งข้อความจากผิวน้ำไปยังนักดำน้ำผ่านจอแสดงผล LCD เมื่อมีข้อความเข้าจะมีไฟจาก LED กระพริบ และข้อความจะกระพริบ เพื่อดึงดูดความสนใจและแจ้งเตือนนักดำน้ำว่ามีข้อความเข้า
- สตรีมวิดีโอจากนักดำน้ำไปยังผิวน้ำผ่านกล้องแสงน้อย
- การตรวจสอบแบบเรียลไทม์โดยใช้สัญญาณไร้สายมาตรฐาน IEEE 802.11 2.4 GHz/5GHz และระบบ Ethernet แบบมีสาย



รูปที่ 1 แนวความคิดในการออกแบบระบบสื่อสารสองทางระหว่างผู้ควบคุมและนักดำน้ำผ่านทุ่นสัญญาณ เพื่อเพิ่มความปลอดภัยใต้น้ำ โดยผู้ควบคุมสามารถส่งข้อความไปแสดงบนจอที่ติดอยู่ที่ข้อมือนักดำน้ำ และที่นักดำน้ำจะส่งภาพแบบ Real Time กลับมายังผู้ควบคุมที่อยู่บนผิวน้ำ



รูปที่ 2 แสดงแผนภาพโครงสร้างระบบสื่อสารสองทาง โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ หน่วยควบคุมบนผิวน้ำ (Surface Controller) ซึ่งใช้คอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรม Unity UI ในการส่งข้อความ และรับภาพแบบ Real-Time เชื่อมต่อผ่านระบบ ไร้สาย ไปยัง ทวนสัญญาณ (Signal Float Buoy) ซึ่งติดตั้ง อุปกรณ์กระจายสัญญาณ Wi-Fi (TP-Link EAP225 Outdoor) ที่ลอยอยู่เหนือผิวน้ำ ทวนนี้เชื่อมต่อผ่านสาย Ethernet กันน้ำไปยังชุดนักดำน้ำ

ระบบสื่อสารสองทางที่นำมาเสนอนี้ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ดังแสดงในรูปที่ 2 ได้แก่

1.1 หน่วยควบคุมบนผิวน้ำ (Surface Controller) ซึ่งใช้คอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรม Unity UI ในการส่งข้อความ และรับภาพแบบ Real-Time เชื่อมต่อผ่านระบบไร้สาย

1.2 ทวนสัญญาณ (Signal Float Buoy) ทวนสัญญาณถูกออกแบบให้ลอยอยู่เหนือผิวน้ำ ทำหน้าที่เป็นจุดเชื่อมต่อสื่อสารระหว่างหน่วยควบคุมบนผิวน้ำและนักดำน้ำ โดยติดตั้งอุปกรณ์กระจายสัญญาณ TP-Link EAP225 Outdoor ซึ่งรองรับย่านความถี่ 2.4 GHz และ 5 GHz เพื่อสร้างเครือข่ายไร้สายเหนือผิวน้ำ ทวนเชื่อมต่อกับชุดนักดำน้ำผ่านสาย Ethernet กันน้ำ (Tether) เพื่อส่งข้อมูลและวิดีโอแบบเรียลไทม์ ในเชิงการออกแบบระยะการสื่อสารที่หวังผล (design/expected) ถูกตั้งไว้เป็นค่ารวมสำหรับการใช้งานจริงคือ 2.4 GHz: 50 - 150 เมตร และ 5 GHz: 15 - 80 เมตร (ค่าที่ออกแบบแบบอนุรักษ์ เพื่อเน้นเผื่อคลื่นทะเล การบังสัญญาณ และ

อุปกรณ์รับที่ต่างกัน) ขณะที่ ระยะที่ใช้จริงจากการทดสอบภาคสนาม (measured/operational) พบว่าทวนสามารถให้การเชื่อมต่อที่เสถียรได้ประมาณ 40 - 60 เมตร ได้สภาวะทะเลปกติ (line-of-sight, ความสูงทวนมาตรฐาน, ลูกคลื่นไม่แรง) ทั้งนี้ค่าที่ได้ขึ้นกับปัจจัย เช่น ความสูงของทวนและเสาอากาศ กำลังส่งและแกนของอุปกรณ์ รับสัญญาณของปลายทาง สภาพคลื่น และความยาวของ Tether จึงแนะนำให้วางแผนออกแบบโดยใช้ค่าหวังผลเป็นเกณฑ์สูงสุด และใช้ค่าที่ใช้จริงสำหรับการปฏิบัติการเชิงสนาม

1.3 ชุดนักดำน้ำประกอบด้วย หน้าจอแสดงข้อความขนาด 3.5 นิ้ว ความสว่าง ≥ 800 nits เพื่อให้มองเห็นข้อความได้ชัดเจนใต้น้ำ แม้ในสภาพแสงน้อยหรือสะท้อนจากผิวน้ำ กล้อง Low-Light HD USB Camera มีความละเอียด 1080p (Full HD) รองรับการบินตก และส่งภาพวิดีโอแบบเรียลไทม์ในสภาพแวดล้อมแสงต่ำ ส่วน Companion Computer (Raspberry Pi 4 Model B) ทำหน้าที่ประมวลผลภาพจากกล้องและส่งข้อมูลผ่านสาย Ethernet กันน้ำไปยังทวนสัญญาณ

2. วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Related Works)

ระบบสื่อสารใต้น้ำที่มีความคล้ายคลึงกับแนวทางที่นำเสนอ มักใช้เทคโนโลยี acoustic modem, optical communication, หรือ long-range wireless relay ซึ่งแต่ละระบบมีข้อดีและข้อจำกัดที่แตกต่างกัน

2.1 ระบบของ EvoLogics (S2C Acoustic Modem) ระบบของ EvoLogics (S2C Acoustic Modem) ทำงานโดยใช้หลักการสื่อสารผ่าน คลื่นเสียงใต้น้ำ (underwater acoustic communication) โดยเฉพาะเทคโนโลยีที่เรียกว่า Sweep Spread Carrier (S2C) ซึ่งมีคุณสมบัติเด่นในการส่งข้อมูลระยะไกลในสภาพแวดล้อมใต้น้ำที่มีสัญญาณรบกวนสูง เช่น ทะเลลึก หรือบริเวณที่แสงและคลื่นวิทยุไม่สามารถใช้งานได้

หลักการทำงาน:

1. ส่งข้อมูลด้วยคลื่นเสียง (Acoustic Signal Transmission)

- โมเด็ม S2C จะแปลงข้อมูลดิจิทัล (เช่น พิกัด GPS หรือข้อความ) เป็นสัญญาณเสียงในย่านความถี่ 18-34 kHz
- ส่งสัญญาณผ่านน้ำไปยังโมเด็มอีกตัวที่อยู่ในระบบ เช่น นักดำน้ำ หรือทุ่นใต้น้ำ

2. รองรับการสื่อสารแบบ Full-Duplex

- สามารถส่งและรับข้อมูลได้ในเวลาเดียวกัน (เช่น ส่งคำสั่งจากผู้ควบคุม และรับข้อมูลตอบกลับจากนักดำน้ำ)

3. การนำทางด้วยเสียง (Diver Navigation)

- โมเด็มใต้น้ำสามารถรับสัญญาณจากทุ่นหรือหน่วยควบคุม เพื่อระบุตำแหน่งและทิศทาง
- ข้อมูลตำแหน่งจะแสดงผลบนอุปกรณ์ของนักดำน้ำ เช่น จอแสดงผล หรือแจ้งเตือนด้วยเสียง

4. การเชื่อมโยงกับหน่วยควบคุมบนผิวน้ำ

- ทุ่น (signal buoy) ที่ลอยอยู่เหนือผิวน้ำจะเป็นตัวกลางในการส่งข้อมูลระหว่างนักดำน้ำกับศูนย์ควบคุมบนผิวน้ำ

- ทุ่นอาจเชื่อมต่อกับระบบ GPS หรือระบบเครือข่ายเพื่อระบุตำแหน่งและควบคุมการสื่อสาร ดังแสดงในรูปที่ 3



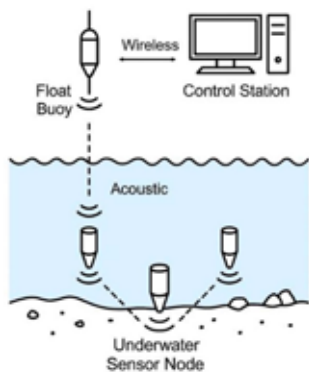
รูปที่ 3 แผนภาพแสดงโครงสร้างระบบนำทางนักดำน้ำแบบใช้เสียง (Acoustic-Based Diver Navigation System) ซึ่งประกอบด้วยหน่วยอุปกรณ์ใต้น้ำ (Underwater Unit) ที่เชื่อมต่อกับโมเด็มอะคูสติก (Acoustic Modem) ส่งสัญญาณไปยังทุ่นสัญญาณ (Signal Buoy) ที่ลอยอยู่เหนือผิวน้ำ ทุ่นทำหน้าที่รับ-ส่งข้อมูลระหว่างนักดำน้ำกับหน่วยควบคุมบนผิวน้ำ ข้อมูลตำแหน่งและเส้นทางจะแสดงผลบนหน้าจอของนักดำน้ำ (Diver Display) เพื่อสนับสนุนการนำทางและการสื่อสารใต้น้ำแบบเรียลไทม์ (ภาพนี้สร้างขึ้นโดยใช้ AI [1])

2.2 ระบบ OceanNet ของ MIT Media Lab

MIT พัฒนา OceanNet ซึ่งใช้ไดรอนลอยน้ำเป็นสถานีฐานไร้สายลอยอยู่เหนือผิวน้ำ โดยใช้ Wi-Fi repeater และเชื่อมต่อกับใต้น้ำผ่านสายเคเบิลหรือ acoustic modem เพื่อถ่ายทอดข้อมูลจากใต้น้ำขึ้นไปยังผิวน้ำ [2] ระบบนี้เน้นการประหยัดพลังงาน และใช้งานในพื้นที่ห่างไกล

หลักการการทำงานของ OceanNet ดังแสดงในรูปที่ 4:

- 1. เซนเซอร์ใต้น้ำ (Underwater Sensor Nodes)
 - ติดตั้งไว้ที่พื้นทะเลหรือวัตถุใต้น้ำ เช่น เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ, ความดัน, สภาพน้ำ
 - บางระบบสามารถเชื่อมต่อกับ acoustic modem เพื่อสื่อสารแบบเสียง หรือใช้สายสัญญาณ (tethered cable) ขึ้นสู่ผิวน้ำ



รูปที่ 4 แผนภาพระบบสื่อสารสองทางระหว่างหน่วยควบคุมบนผิวน้ำ ฟันลอย และเซนเซอร์ใต้น้ำ โดยแสดงการสื่อสารแบบไร้สายและเสียง

- 2. สายเคเบิลหรืออะคูสติกโมเด็ม (Wired/Acoustic Communication)
 - เชื่อมข้อมูลจากเซนเซอร์ไปยังอุปกรณ์บนผิวน้ำ
 - กรณีไม่มีสาย จะใช้ acoustic modem เพื่อส่งข้อมูลแบบไร้สายผ่านน้ำ

- 3. ฟันหรือโดรนลอยน้ำ (Surface Floating Drone/Buoy)
 - ทำหน้าที่เป็น เกตเวย์ไร้สาย (Wireless Gateway)
 - ภายในติดตั้ง Wi-Fi repeater หรือ Wi-Fi router เพื่อกระจายข้อมูลสู่ระบบบนผิวน้ำ
 - ใช้พลังงานจากแผงโซลาร์เซลล์ (ในบางรุ่น)

- 4. การสื่อสารแบบสองทาง (Two-Way Communication)
 - สามารถรับคำสั่งจากศูนย์ควบคุมและส่งลงไปยังเซนเซอร์ หรือส่งข้อมูลจากใต้น้ำขึ้นมายังเครื่อง
 - เหมาะกับการใช้งานที่ต้องการ เครือข่ายเซนเซอร์ทะเล เช่น ocean monitoring หรือ marine research

2.3 ระบบที่นำเสนอในบทความนี้

แตกต่างจากระบบข้างต้น ระบบนี้ใช้โครงข่าย Wi-Fi แบบ Local Area Network (LAN) ที่ไม่มีการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต โดยใช้ TP-Link EAP225 ทำงานในโหมด Access Point บนฟัน แล้วเชื่อมต่อไปยัง Raspberry Pi ด้วยสาย Ethernet เพื่อส่งข้อมูลภาพจาก USB Camera และรับคำสั่งควบคุมจากผู้ใช้ผ่านโปรโตคอล ZMQ (ZeroMQ) ซึ่งสามารถส่งข้อมูลความเร็วสูงแบบเรียลไทม์ได้บนเครือข่ายภายใน (LAN) เปรียบเทียบ การสื่อสารใต้น้ำของระบบที่นำเสนอ กับระบบ EvoLogics (S2C Modem) และระบบ OceanNet (MIT) รายละเอียดตามตารางที่ 1 และข้อเด่นในการใช้งาน รายละเอียดตามตารางที่ 2

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบระบบสื่อสารใต้น้ำ ทั้ง 3 ระบบ

รายการเปรียบเทียบ	ระบบที่เสนอ (Proposed System)	EvoLogics (S2C Modem)	OceanNet (MIT)
แนวคิดหลัก	สื่อสารผ่านเครือข่าย Wi-Fi ภายใน (LAN) โดยไม่พึ่งอินเทอร์เน็ตและระบบ Ethernet	ใช้คลื่นเสียงใต้น้ำ (acoustic modem) สื่อสารแบบ full duplex	ใช้ Wi-Fi repeater และ sensor ใต้น้ำ เชื่อมกับ drone หรือ buoy

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบระบบสื่อสารใต้น้ำ ทั้ง 3 ระบบ

วิธีส่งข้อความจากผู้ควบคุม	พิมพ์บน UI ของคอมพิวเตอร์ (Unity) แล้วส่งโดย ZMQ Protocol ไปยัง Raspberry Pi ผ่าน wifi และ Ethernet	ใช้ซอฟต์แวร์พิเศษบนคอมพิวเตอร์ ส่งข้อมูลเสียง (encoded) ไปยังนักดำน้ำ	ส่งข้อมูลผ่าน repeater หรือ gateway เชื่อม sensor node
การแจ้งเตือนนักดำน้ำ	LED บนข้อมือกะพริบ 5 ครั้ง + จอ 3.5" แสดงข้อความ	มีหน้าจอ (optional) หรือสัญญาณเสียงบีบแฉ่งเตือน	ไม่เน้น UI บน diver unit (ขึ้นอยู่กับ การประยุกต์ใช้งาน)
การส่งข้อความจากนักดำน้ำ	ใช้กระดานเขียนใต้น้ำ หรือสัญญาณมือ (low-cost approach)	สามารถส่งข้อความกลับ (full duplex)	ใช้ sensor node สำหรับข้อมูล เช่น อุณหภูมิ ความดัน
การส่งวิดีโอ	✅ ส่งภาพจากกล้อง Low-Light HD USB Camera: ความละเอียด 1920x1080 (Full HD) ส่งภาพ real-time video แบบ 30 fps	❌ ไม่สามารถส่งวิดีโอ (bandwidth ต่ำ)	✅ ส่งวิดีโอ ความละเอียดต่ำผ่าน gateway
ระยะทางใช้งานโดยทั่วไป	ขึ้นอยู่กับความแรง Wi-Fi (30-100 เมตร จาก AP)	ได้ถึง ~1500 เมตร (ในน้ำเปิด)	100-500 เมตร (Wi-Fi + tethered node)
ข้อดี	ราคาถูก, ใช้อุปกรณ์ทั่วไป, แสดงผลชัดเจน, ไม่พึ่งเน็ต	ใช้ได้ใต้น้ำลึกและระยะไกล, มาตรฐานสูง	ใช้งานได้นาน, ประหยัดพลังงาน, ใช้ sensor network ได้
ข้อจำกัด	Wi-Fi ใช้ได้เฉพาะบนผิวน้ำระยะการสื่อสารที่หวังผล (design/expected) อยู่ที่ 2.4 GHz: 50-150 เมตร และ 5 GHz: 15-80 เมตร ตามมาตรฐาน IEEE 802.11 ขณะที่ ระยะที่ใช้จริงจากการทดสอบภาคสนาม (measured/operational) พบว่าสามารถให้การเชื่อมต่อเสถียรได้ประมาณ 40-60 เมตร ภายใต้สภาพทะเลปกติ, สาย Ethernet ระยะที่เหมาะสมอยู่ที่ 50-70 เมตรต่องันน้ำ	แพงมาก, ส่งวิดีโอไม่ได้, ตั้งค่าซับซ้อน	ไม่เหมาะกับงาน real-time UI หรือ human interaction โดยตรง
เหมาะกับใคร	ฝึกดำน้ำ, การเฝ้าระวังนักดำน้ำ, งานภาคสนามต้นทุนต่ำ	งานวิจัย, การนำทางใต้น้ำ, การสำรวจลึก	เครือข่ายตรวจสอบสภาพแวดล้อมทะเล, งานติดตั้งถาวร
ราคาโดยประมาณ	ต่ำ (5,000-15,000 บาท ทั้งระบบต่อชุด)	สูงมาก (หลักแสน-ล้านบาท/ชุด)	กลางถึงสูง (ขึ้นกับ sensor และ repeater)

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบระบบสื่อสารใต้น้ำ ทั้ง 3 ระบบ (ต่อ)

รายการเปรียบเทียบ	ระบบที่เสนอ (Proposed System)	EvoLogics (S2C Modem)	OceanNet (MIT)
ใช้ในพื้นที่ไร้สัญญาณอินเทอร์เน็ตได้หรือไม่	✓ ได้ (LAN ภายใน)	✓ ได้	✓ ได้

ตารางที่ 2 สรุป ข้อดีข้อด้อยของแต่ละระบบ เพื่อประโยชน์ในการเลือกใช้งาน

ระบบ	จุดเด่น	จุดด้อย
ระบบที่เสนอ	ประหยัด, ใช้อุปกรณ์ทั่วไป, ส่งวิดีโอ, UI ชัดเจน, ง่ายต่อการนำไปใช้ฝึกดำน้ำ	พึ่งพาลากสาย LAN และการทำงานบนผิวน้ำ
EvoLogics	ระยะทางไกล, มาตรฐานสูง, ใช้ในงานระดับอุตสาหกรรม	ราคาสูง, ส่งวิดีโอไม่ได้ ไม่เหมาะกับการสื่อสารแบบมี UI ทันที
OceanNet (MIT)	ใช้ sensor network, ขยายระบบได้, พลังงานต่ำ	ระหว่างมนุษย์

3. การออกแบบระบบ

3.1 โครงสร้างระบบ

ระบบประกอบด้วยสามส่วนหลัก ได้แก่:

3.1.1 หน่วยควบคุมบนผิวน้ำ

(Surface Controller Unit)

- Laptop พร้อมโปรแกรม Unity UI: ใช้แสดงภาพวิดีโอจากนักดำน้ำ และส่งข้อความควบคุม
- ZMQ Protocol: ใช้สำหรับส่งและรับข้อมูลแบบเรียลไทม์ผ่าน IP Network [4]

3.1.2 ทวนสัญญาณ (Signal Buoy)

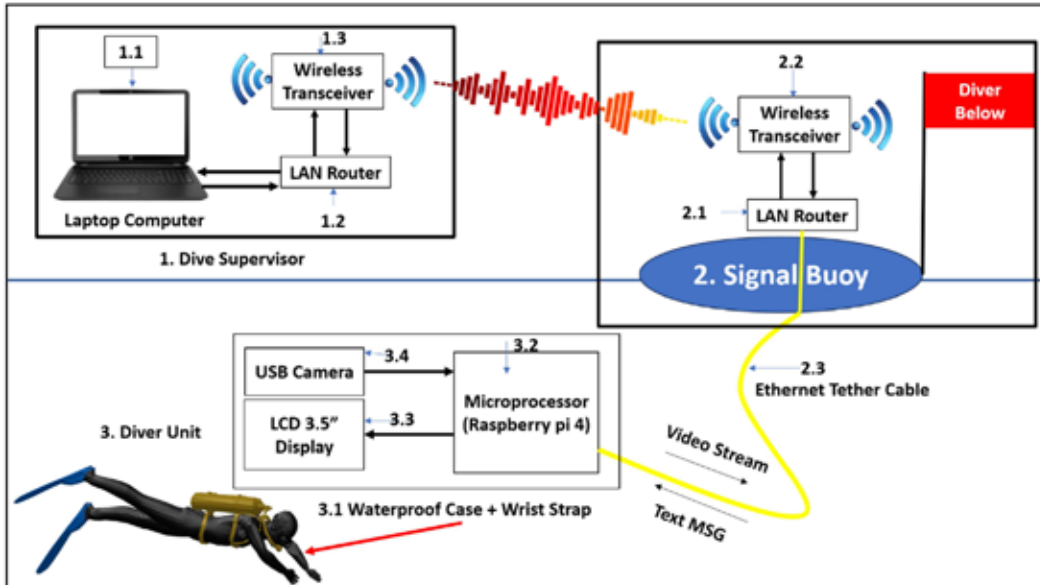
- อุปกรณ์กระจายสัญญาณ Wi-Fi (TP-Link EAP225 Outdoor) 2.4GHz/5 GHz ทำงานในโหมด Access Point (AP Mode)
- Ethernet Cable กันน้ำ: เชื่อมต่อจากอุปกรณ์ Wi-Fi ไปยัง Raspberry Pi ใต้น้ำ

3.1.3 หน่วยนักดำน้ำ (Diver Unit)

- Raspberry Pi 4: หน่วยประมวลผล [5] รับข้อความจากผิวน้ำและส่งวิดีโอจากกล้อง USB
- USB Camera: บันทึกภาพวิดีโอแบบเรียลไทม์
- Python Script (ZMQ PUB/SUB): ใช้สถาปัตยกรรม Publisher/Subscriber ผ่านโปรโตคอล ZeroMQ เพื่อส่งภาพและรับคำสั่งจากหน่วยควบคุม [6]

3.2 หลักการทำงานของระบบ

ระบบต้นแบบที่นำเสนอประกอบด้วย 3 หน่วยหลัก ได้แก่ หน่วยควบคุมบนผิวน้ำ (Dive Supervisor), ทวนสัญญาณ (Signal Buoy), และ หน่วยนักดำน้ำ (Diver Unit) ซึ่งทำงานร่วมกันเพื่อให้เกิดการสื่อสารสองทางในพื้นที่ที่ไม่มีสัญญาณอินเทอร์เน็ต โดยมีรายละเอียดการทำงานแสดงในรูปที่ 5 ดังนี้:



รูปที่ 5 แสดง โครงสร้างระบบสื่อสารระหว่างผู้ควบคุมบนผิวน้ำ (Dive Supervisor) และนักดำน้ำ (Diver Unit) ผ่านทุ่นสัญญาณ (Signal Buoy) โดยใช้เทคโนโลยีไร้สายและสาย Ethernet

3.2.1 หน่วยควบคุมบนผิวน้ำ (Dive Supervisor) คอมพิวเตอร์แล็ปท็อป: ติดตั้งโปรแกรมอินเทอร์เฟซ ซึ่งพัฒนาจาก โปรแกรม Unity Engine ดังแสดง ในรูปที่ 6 เพื่อ



รูปที่ 6 หน้าจอสำหรับผู้ใช้ออกแบบจากโปรแกรม Unity Engine

- แสดงภาพวิดีโอจากกล้องของนักดำน้ำแบบเรียลไทม์ Real-time underwater โดย USB camera 640x480 @30 fps latency ประมาณ 30-100 ms
- ส่งข้อความตัวอักษรไปยังนักดำน้ำ

คอมพิวเตอร์แล็ปท็อปจะรับส่งข้อมูลผ่าน Wi-Fi ที่ส่งมาจาก TP-Link EAP225 ที่อยู่บน ทุ่นสัญญาณส่งสัญญาณความถี่ย่าน 2.4GHz หรือ 5GHz เพื่อ

- ส่งข้อความจากผู้ควบคุม
- รับภาพวิดีโอจากนักดำน้ำผ่านทุ่น

3.2.2 ทุ่นสัญญาณ (Signal Buoy) ตัวรับ-ส่งสัญญาณไร้สายเราเตอร์ LAN (โหมด Access Point): TP-Link EAP225 ทำงานเป็น Access Point (AP) เพื่อให้ Laptop เชื่อมต่อผ่าน Wi-Fi ภายในระบบโดยไม่ต้องพึ่งอินเทอร์เน็ตภายนอก สร้างเครือข่าย LAN แบบไร้สายเฉพาะกิจสำหรับอุปกรณ์ทั้งหมด และเชื่อมต่อกับ Raspberry Pi ที่อยู่ใต้น้ำผ่านสาย Ethernet รับสัญญาณข้อความจากผู้ควบคุมบนผิวน้ำและส่งต่อไปยัง Raspberry Pi ที่ผู้ดำน้ำใช้เหมือนนักดำน้ำ ระบบ Tp-link EAP225 มี Auto Band Steering โดยระบบจะเลือกคลื่นที่ดีที่สุดให้เอง ตามสัญญาณ, ความหนาแน่น, หรือความเร็ว ผู้ใช้ไม่ต้องเลือกเอง ตัว AP จะสลับ 2.4G ↔ 5G ให้อัตโนมัติ[3]

ตัวอย่างบนโน้ตบุ๊ก:

ถ้าเปิด Auto Band Steering บน AP และอุปกรณ์ Surface เชื่อมต่อ SSID เดียวกัน

Surface อาจใช้ 5 GHz เมื่ออยู่ใกล้ AP → เปลี่ยนไป 2.4 GHz อัตโนมัติเมื่อเดินออกไปไกล

สาย Ethernet แบบกันน้ำ: เชื่อมต่อพุนกับ Raspberry Pi โดยตรงเพื่อให้การรับ-ส่งข้อมูลมีความเสถียรและความเร็วสูง ประกอบด้วย

- ส่งภาพวิดีโอจากนักดำน้ำขึ้นสู่ผิวน้ำ
- ส่งข้อความจากผิวน้ำลงสู่นักดำน้ำ



รูปที่ 7 แบบจำลอง (Mockup) ชุดนักดำน้ำ

(Diver Unit) ส่งภาพ จาก USB Camera

และรับข้อความแสดงบนจอการกำหนด IP แบบ Static

ตารางที่ 3 สรุปทิศทางการส่งข้อมูล

ทิศทาง	เส้นทางการสื่อสาร	เทคโนโลยีที่ใช้
นักดำน้ำ → ผิวน้ำ	กล้อง USB → Raspberry Pi → Ethernet → พุน → Wi-Fi → แล็ปท็อป	สตรีมวิดีโอ (ZMQ ผ่าน LAN)
ผิวน้ำ → นักดำน้ำ	UI (แล็ปท็อป) → Wi-Fi → พุน → Ethernet → Raspberry Pi → จอแสดงผล	ข้อความ (ZMQ)

3.3 การเลือกใช้สายสัญญาณ

การรับ-ส่งข้อมูล ระหว่าง นักดำน้ำที่อยู่ใต้น้ำ ขึ้นไปยังตัวส่งสัญญาณ wifi Tp-link EAP225 จะใช้สาย ซึ่งมีให้เลือก 3 แบบด้วยกันได้แก่

UTP = Unshielded Twisted Pair

(สายคู่บิดเกลียวแบบไม่มีชีลด์)

STP (Shielded Twisted Pair)

(คู่บิดเกลียวที่มีชีลด์)

3.2.3 หน่วยนักดำน้ำ (Diver Unit) กล้องกันน้ำ +

สายรัดข้อมือ: ป้องกัน Raspberry Pi และจอแสดงผลจากน้ำทะเล ติดตั้งบริเวณท่อนแขนเพื่อให้สามารถมองเห็นและใช้งานได้สะดวก ดังแสดงในรูปที่ 7

ไมโครโปรเซสเซอร์ (Raspberry Pi 4): ทำหน้าที่เป็นหน่วยประมวลผลหลัก ได้แก่

- รับภาพจากกล้อง USB
- เข้ารหัสและส่งวิดีโอผ่านสาย Ethernet ไปยังพุน
- รับข้อความจากผู้ควบคุมและแสดงผลบนหน้าจอ

หน้าจอ LCD ขนาด 3.5 นิ้ว: แสดงข้อความที่ได้รับอย่างชัดเจน รวมถึงสามารถแสดงภาพตัวอย่างวิดีโอหรือสัญญาณแจ้งเตือนได้ตามการตั้งค่า

กล้อง Low-Light HD USB Camera : ทำหน้าที่บันทึกภาพวิดีโอใต้น้ำตลอดเวลา และส่งไปยังผู้ควบคุมผ่าน Raspberry Pi และระบบ Wi-Fi

o ทั้งอุปกรณ์ในระบบกำหนด IP ภายใน เช่น:

- Laptop: 192.168.1.10
- TP-Link EAP225: 192.168.1.1
- Raspberry Pi 4: 192.168.1.100

o Subnet: 255.255.255.0

สรุป ทิศทางการสื่อสารสองทาง แสดงดังตารางที่ 3

Fiber Optic Cable (แกนแก้ว/พลาสติกนำแสง)

โดยได้ทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติของสายสัญญาณแบบ UTP vs STP vs Fiber สำหรับงานใต้น้ำ แสดงดังตารางที่ 4 สรุปได้ดังนี้

■ UTP (Fathom ROV Tether) → เหมาะสมต่อการใช้งานระยะสั้น ประมาณ 25 เมตร สำหรับการส่งข้อมูลทั้งข้อความและวิดีโอความละเอียดสูง (HD) โดยมีค่าใช้จ่ายในระดับประหยัดที่สุด

- STP → เหมาะสมในกรณีที่ ROV มีมอเตอร์ไฟฟ้ากำลังสูง หรือไฟส่องสว่างใต้น้ำ (floodlight) ซึ่งอาจก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI) ส่งผลกระทบต่อความเสถียรของสัญญาณ Ethernet

■ Fiber Optic → เหมาะกับงาน ROV เชิงวิจัยหรือเชิงพาณิชย์ ที่ต้องการสตรีมหลายกล้อง, 4K/VR, หรือใช้ระยะ หลายร้อยเมตร-กิโลเมตร แต่ต้องลงทุนเพิ่ม (Media Converter + สาย + คอนเน็กเตอร์กันน้ำ)

ตารางที่ 4 ตารางเปรียบเทียบ UTP vs STP vs Fiber (สำหรับงานใต้น้ำ)

คุณสมบัติ	UTP (Unshielded Twisted Pair)	STP (Shielded Twisted Pair)	Fiber Optic Cable
โครงสร้าง	สายทองแดงบิดเกลียว ไม่มีชีลด์	สายทองแดงบิดเกลียว + พอยล์/ตาข่ายโลหะหุ้ม	แกนแก้ว/พลาสติก ส่งข้อมูล ด้วยแสง
ทนสัญญาณรบกวน (EMI/Noise)	ต่ำ	สูง (ดีกว่า UTP)	สามารถทนต่อสัญญาณรบกวนได้เป็นอย่างดี
Bandwidth (ทฤษฎี)	100 Mbps – 1 Gbps (Cat5e/Cat6)	1 – 10 Gbps (Cat6a/Cat7)	หลาย Gbps – Tbps
Latency (25 m)	~1–2 ms	~1 ms	<1 ms
ระยะใช้งานสูงสุด	~100 m	~100 m	หลาย km
ความแข็งแรง (ใต้น้ำ)	แข็งแรง, ทนงอ	หนักกว่า UTP, ซีลยากกว่า	เปราะกว่า, ต้องระวังการงอ/แตก
ต้นทุนสาย	ต่ำ (~30–50 บาท/เมตร)	กลาง (~50–100 บาท/เมตร)	สูง (200–500+ บาท/เมตร)
อุปกรณ์เสริม	ไม่ต้องมีเพิ่ม	ไม่ต้องมีเพิ่ม	ต้องใช้ Media Converter / SFP Module
เหมาะกับงาน	ระบบใต้น้ำระยะสั้น (≤100 m), วิดีโอ HD, ข้อความ	งานใต้น้ำที่มี noise เยอะ เช่น ROV มีมอเตอร์, ไฟแรงสูง	งานวิจัย/ROV ระยะไกล, ต้องการภาพหลายช่อง/4K+, ต้องการความเสถียรสูงสุด
ข้อดีเด่น	ถูก, หาง่าย, ติดตั้งง่าย	กันรบกวนดีกว่า, ยังใช้คอนเน็กเตอร์ Ethernet ปกติได้	Bandwidth สูงสุด, ระยะไกล, ไม่ถูกรบกวน
ข้อจำกัด	รบกวนง่าย, ระยะไม่เกิน 100 m	หนักขึ้น, แพงกว่า UTP	ราคาแพง, ต้องใช้ converter, สายเปราะ

4. การนำไปใช้ (Application)

ระบบสื่อสารสองทางระหว่างผู้ควบคุมบนผิวน้ำและนักดำน้ำผ่านหุ่นสัญญาณ ได้รับการออกแบบมาเพื่อรองรับภารกิจใต้น้ำที่ต้องการความปลอดภัยและประสิทธิภาพ

ในการสื่อสาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริบทของการฝึกและภารกิจเชิงยุทธวิธี ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้งานได้ สถานการณ์ต่อไปนี้:

• การฝึกดำน้ำเบื้องต้น (SOLO Dive Training): ระบบนี้สามารถช่วยเพิ่มความปลอดภัยในการฝึกนักดำน้ำใหม่ที่ยังไม่มีประสบการณ์ ด้วยการอนุญาตให้ผู้ควบคุมบนผิวน้ำสามารถสื่อสาร ส่งคำแนะนำ และรับภาพจากกล้องของนักดำน้ำได้แบบเรียลไทม์ ทำให้สามารถเฝ้าสังเกตพฤติกรรมและตอบสนองเหตุการณ์ฉุกเฉินได้ทันทีโดยไม่ต้องมีนักดำน้ำผู้ช่วยลงไปใต้น้ำร่วมฝึก

• การสำรวจใต้น้ำระยะไกล (Remote Underwater Inspection): เช่น การตรวจสอบท่อส่งน้ำ พุน้ำ หรือโครงสร้างใต้น้ำ ระบบสามารถส่งภาพจากกล้องที่นักดำน้ำถืออยู่กลับมายังศูนย์ควบคุมผ่านสัญญาณไร้สาย เพื่อให้วิศวกรหรือผู้เชี่ยวชาญวิเคราะห์ข้อมูลได้ทันที

• การวิจัยทางทะเล (Marine Research): นักวิจัยสามารถใช้ระบบนี้ในการบันทึกภาพสิ่งมีชีวิตใต้ทะเลในสภาพแวดล้อมธรรมชาติ และยังสามารถสื่อสารกับนักดำน้ำภาคสนามเพื่อเปลี่ยนแปลงแผนการสำรวจหรือจุดเก็บตัวอย่างได้ทันที

5. คุณสมบัติเด่นของระบบ

• ไม่ต้องใช้อินเทอร์เน็ต: ระบบทำงานได้อย่างอิสระภายในเครือข่ายท้องถิ่น (LAN) ที่กำหนด IP อยู่ในกลุ่มเดียวกัน (เช่น 192.168.1.x)

• การตอบสนองแบบเรียลไทม์: ผู้ควบคุมสามารถเฝ้าติดตามภาพจากนักดำน้ำได้ทันที

• การส่งข้อความแบบสองทาง: ส่งคำสั่ง คำเตือน หรือข้อความตรวจสอบสถานะ

- ต้นทุนต่ำ: ใช้อุปกรณ์ทั่วไปที่หาได้ในท้องตลาด
- สามารถขยายเพิ่มเติม: รองรับการจัดตั้งเซนเซอร์อื่น ๆ เช่น เซนเซอร์วัดความลึก
- อนุหนุมิ หรือการรั่วซึม

6. ศักยภาพในการผลักดันเป็นอุปกรณ์มาตรฐานความปลอดภัย

จากศักยภาพที่กล่าวมา ระบบนี้สามารถต่อยอดเป็น “อุปกรณ์มาตรฐานความปลอดภัยสำหรับการฝึกนักดำน้ำใหม่” ได้ในอนาคต ด้วยเหตุผลดังนี้:

• ช่วยเพิ่มความมั่นใจให้กับครูฝึกและนักดำน้ำในการเฝ้าสังเกตและสื่อสารแบบสองทางได้ตลอดเวลา

• ลดความเสี่ยงจากการสื่อสารไม่เข้าใจหรือเหตุฉุกเฉินที่ตอบสนองล่าช้า

• ส่งเสริมการพัฒนาหลักสูตรฝึกดำน้ำที่เน้นการเรียนรู้ด้วยตนเอง (self-directed learning) ในขณะที่ยังคงมาตรฐานความปลอดภัยที่เข้มงวด

• เหมาะกับการใช้ในศูนย์ฝึกดำน้ำทั้งทางทหารและพลเรือน ศูนย์วิจัยทางทะเล หรือสถานฝึกดำน้ำภาคสนามของมหาวิทยาลัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] EvoLogics GmbH, “Underwater acoustic communication systems,” 2024. [Online]. Available: <https://evologics.de>. Accessed: Jan. 30, 2026.
- [2] MIT Media Lab, “OceanNet: Underwater wireless sensor network,” 2023. [Online]. Available: www.media.mit.edu. Accessed: Jan. 30, 2026.
- [3] TP-Link, “EAP225-outdoor access point,” 2024. [Online]. Available: <https://www.tp-link.com/th/>. Accessed: Jan. 30, 2026.
- [4] “ZeroMQ-Messaging library,” ZeroMQ, 2025. [Online]. Available: <https://zeromq.org/>. Accessed: Jun. 15, 2025.
- [5] Raspberry Pi Foundation, “Raspberry Pi 4 Model B,” 2025. [Online]. Available: www.raspberrypi.org. Accessed: Jun. 15, 2025.
- [6] S. Vinoski, “Advanced message queuing protocol,” *IEEE Internet Comput.*, vol. 10, no. 6, pp. 87-89, Nov.-Dec. 2006. doi: 10.1109/MIC.2006.116.
- [7] OpenAI, “DALL-E 3,” AI image generation tool, Oct. 2025. [Online]. Available: openai.com. Accessed: Jan. 30, 2026.